

JP 8264039 Super conductor

DIALOG(R)File 351:DERWENT WPI(c)1998 Derwent Info Ltd. All rts. reserv.
011013855 **Image available**
WPI Acc No: 96-510805/199651
XRPX Acc No: N96-430659

Superconductor cable for superconductor appts. e.g. for pulsed and AC magnet - has twisted lines of same twist degree and twisted lines of high twist degree so that electrical resistance per unit length is large

Patent Assignee: JAPAN ATOMIC ENERGY RES INST (JAAT); TOSHIBA KK (TOKE)

Number of Countries: 001 Number of Patents: 001

Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Main IPC	Week
JP 8264039	A	19961011	JP 95285330	A	19951101	H01B-012/08	199651 B

Priority Applications (No Type Date): JP 9510663 A 19950126

Patent Details:

Patent	Kind	Lan	Pg	Filing Notes	Application	Patent
JP 8264039	A		17			

Abstract (Basic): JP 8264039 A

The cable has primary twisted lines (12) which include several superconductor strands (11). Several secondary twisted lines (13) include several primary twisted lines.

The second twisted lines form a third-degree twisted line (14). The electrical resistance value per unit length between twisted lines of same twist degree, and between twisted lines of high twist degree is big.

USE/ADVANTAGE - For superconductor transformer, generator, stator winding wire, and current limiter. Eliminates large path of coupling current and reduces AC loss by stranding same twisted line having same electrical resistance value per unit length. Moves several current in multiple strands since electrical resistance between strands is small. Deters breaking down of cable by recovering superconductor state through transition of usual conduction state. Improves redistribution nature of current movement between strands. Improves stability of cable. Decreases electrical resistance even if twisting pitch is increased. Dwg.1/17

Derwent Class: X11; X12; X13

International Patent Class (Main): H01B-012/08

International Patent Class (Additional): H01F-006/06

Manual Codes (EPI/S-X): X11-H05; X12-C01E; X12-C05A; X12-D06A; X13-C03

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-264039

(43) 公開日 平成8年(1996)10月11日

(51) Int.Cl. ⁸	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 B 12/08	Z A A		H 0 1 B 12/08	Z A A
H 0 1 F 6/06	Z A A		H 0 1 F 5/08	Z A A B

審査請求 未請求 請求項の数20 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平7-285330

(22) 出願日 平成7年(1995)11月1日

(31) 優先権主張番号 特願平7-10663

(32) 優先日 平7(1995)1月26日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000004097

日本原子力研究所

東京都千代田区内幸町2丁目2番2号

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72) 発明者 小泉 徳潔

茨城県那珂郡那珂町大字向山801番地の1

日本原子力研究所 那珂研究所内

(72) 発明者 小野 通隆

神奈川県横浜市鶴見区末広町2の4 株式

会社東芝京浜事業所内

(74) 代理人 弁理士 波多野 久 (外1名)

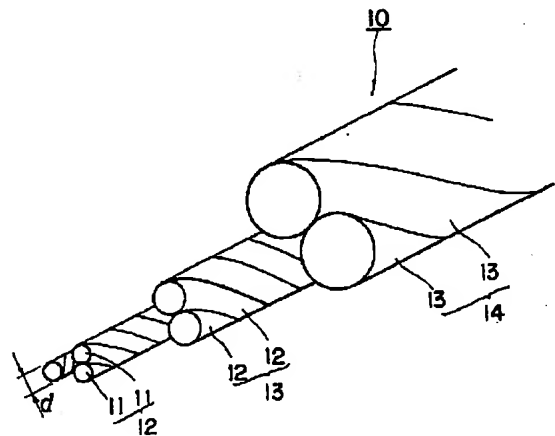
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超電導ケーブル

(57) 【要約】

【課題】 安定性の確保と交流損失の低減を同時に実現できる超電導ケーブルを提供する。

【解決手段】 超電導ケーブルは、複数の超電導素線11...11を撚り合わせて成る撚線を備える。この撚線を、複数の超電導素線11...11を撚り合わせて成る複数の一次撚線12...12、この複数の一次撚線12...12を撚り合わせて成る複数の二次撚線13...13、この複数の二次撚線13...13を撚り合わせて成る三次撚線（高次撚線）14で形成する。撚り次数の同じ撚線間の単位長さ当たりの電気抵抗値を撚り次数の高い撚線間ほど大きく設定する。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 超電導素線を複数本燃り合せて一次燃線を構成し、この一次燃線を複数本燃り合せて二次燃線を構成し、以後順次同様に燃り合せて高次燃線を構成した超電導ケーブルにおいて、燃り次数の同じ燃線間の単位長さ当たりの電気抵抗値が、燃り次数が高い燃線間ほど大きな値となるように構成したことを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項2】 高次燃線の最終燃り次数をNとしたとき、(N-1)次以下の燃り次数を持つ燃線のうち、少なくとも1つの任意次数の燃線外表面に、高抵抗体の被膜を形成した請求項1記載の超電導ケーブル。

【請求項3】 高抵抗体の被膜は、燃り次数の低い燃線より燃り次数の高い燃線ほど膜厚を厚く形成した請求項2記載の超電導ケーブル。

【請求項4】 高抵抗体の被膜は、燃り次数の低い燃線より燃り次数の高い燃線ほど電気抵抗の大きな被膜材料で形成した請求項2記載の超電導ケーブル。

【請求項5】 燃線は燃り次数が高くなるに従って燃りピッチが大きくなるように設定された請求項1記載の超電導ケーブル。

【請求項6】 一次燃線は、超電導素線の直径をdとしたとき、燃りピッチ L_{p1} を $L_{p1} \leq 20d$ の範囲に設定した請求項1または5に記載の超電導ケーブル。

【請求項7】 二次燃線は、一次燃線の外接円の直径をD1としたとき、燃りピッチ L_{p2} を $L_{p2} \leq 30D1$ の範囲に設定するとともに、三次燃線は、二次燃線の外接円の直径をD2としたとき、燃りピッチ L_{p3} を $L_{p3} \leq 40D2$ の範囲に設定した請求項6記載の超電導ケーブル。

【請求項8】 高次燃線の構成後、高次燃線に臨界荷重以下の引張荷重を印加させて燃線間を圧着させた請求項1記載の超電導ケーブル。

【請求項9】 燃りピッチが L_{pn} で燃り次数がNの高次燃線は、(N-1)次の燃線間の電気抵抗が、燃りピッチ L_{p1} の一次燃線の超電導素線間の電気抵抗の(L_{pn}/L_{p1})の2乗倍以上に設定した請求項1記載の超電導ケーブル。

【請求項10】 超電導素線を複数本燃り合せて一次燃線を構成し、この一次燃線を複数本燃り合せて二次燃線を構成し、以後順次同様に燃り合せて高次燃線を構成した超電導ケーブルにおいて、上記高次燃線を不活性ガスあるいは真空中で昇温させて燃りの交差部を固相拡散接合し、電気的短絡部を形成したことを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項11】 複数本の超電導素線から成る燃線と、この燃線の燃りピッチの整数倍に相当する当該燃線の交差位置における上記超電導素線の単位長さ当たりの電気*

$$r_c = (L \cdot l_c) / (R_n \cdot l_d + 2R_c) < \tau_h$$

2

* 抵抗値を上記交差位置を挟む位置における上記電気抵抗値よりも小さくするための電気抵抗を有する電気的短絡部とを備え、この電気的短絡部を上記交差位置に設けると共に、

上記超電導素線の長手方向の熱拡散距離を l_d とし、当該超電導素線の熱伝導率及びその熱容量を κ 及び ρC とし、当該超電導素線に対し外乱の加わる時間を τ_q としたとき、上記熱拡散距離 l_d を、

【数1】

$$l_d = 2 \sqrt{\frac{\kappa}{\rho C} \cdot \tau_q}$$

の式で求め、且つ、

上記電気的短絡部の電気抵抗値を R_c とし、上記超電導素線の常電導転移時における単位長さ当たりの電気抵抗値を R_n とし、当該超電導素線の超電導特性及びその冷媒条件で定まる制限電流値及び臨界電流値を I_{lim} 及び I_c としたとき、上記電気的短絡部の電気抵抗値 R_c を、

【数2】

$2R_c / (2R_c + R_n \times l_d) \leq I_{lim} / I_c$ の条件式を満たす範囲に設定したことを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項12】 複数本の超電導素線から成る燃線と、この燃線の長手方向に沿って一定間隔毎に配置した位置における上記超電導素線の単位長さ当たりの電気抵抗値を上記配置位置を挟む位置における上記電気抵抗値よりも小さくするための電気抵抗を有する電気的短絡部とを備え、この電気的短絡部を上記配置位置に設けると共に、

上記電気的短絡部間の距離を l_c とし、上記超電導素線の長手方向の熱拡散距離を l_d とし、当該超電導素線の常電導転移時における電気抵抗値を R_n とし、上記電気的短絡部の電気抵抗値を R_c とし、上記常電導転移した上記超電導素線及びこの超電導素線に隣接する超電導状態を維持している超電導素線の互いのインピーダンス特性で定まる単位長さ当たりの漏れインダクタンスを L とし、

上記超電導素線の電気抵抗値 R_n 、上記電気的短絡部の電気抵抗値 R_c 、及び上記漏れインダクタンス L で定まる回路時定数を τ_c とし、

上記超電導素線に対し過渡熱伝達が支配する時間を τ_h としたとき、

上記熱拡散距離 l_d が上記電気的短絡部間の距離 l_c よりも小さいとき($l_d < l_c$)、当該電気的短絡部間の距離 l_c を、

【数3】

$$r_c = (L \cdot l_c) / (R_n \cdot l_d + 2R_c) < \tau_h$$

の条件式を満たす範囲に設定すると共に、

※50※ 上記熱拡散距離 l_d が上記電気的短絡部間の距離 l_c よ

3

りも大きいとき ($ld > lc$)、当該電氣的短絡部間の距離 lc を、

【数4】

$$\tau c = (L \cdot lc) / (Rn \cdot lc + 2Rc) < \tau h$$

の条件式を満たす範囲に設定したことを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項13】 前記燃線は、前記複数本の超電導素線を互いに燃り合わせて成る一次の燃線及びこの一次の燃線を互いに燃り合わせて成る二次の燃線を含む高次燃線であり、この高次燃線の内の各次の燃線における各燃り10 ピッチの最小公倍数が前記電氣的短絡部間の距離と等しくなる条件で上記各燃りピッチを設定した請求項12記載の超電導ケーブル。

【請求項14】 前記高次燃線の各次の各燃りピッチの最小公倍数が前記電氣的短絡部間の距離よりも大きいとき、上記高次燃線の内の一次から任意次数までの燃線の各燃りピッチの最小公倍数が上記電氣的短絡部間の距離よりも小さくなるときの上記一次から任意次数までの燃線に上記電氣的短絡部を設けた請求項13記載の超電導20 ケーブル。

【請求項15】 複数本の超電導素線から成る燃線を備えた超電導ケーブルにおいて、上記超電導素線に対して外部磁界の変化に起因して生じる誘導起電力と、上記燃線の燃りピッチ及び上記超電導素線の長手方向の熱拡散距離の内のいずれか一方で定まる当該超電導素線の常電導転移時の発生電圧とに基づいて、上記燃りピッチを上記誘導起電力が上記発生電圧よりも小さい条件を満足する範囲に設定したことを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項16】 前記燃線は、前記複数本の超電導素線を互いに燃り合わせて成る一次の燃線及びこの一次の燃線を互いに燃り合わせて成る二次の燃線を含む高次燃線であり、この高次燃線の各次の燃線毎の前記誘導起電力の総和と、当該各次の燃線の各燃りピッチ及び前記熱拡散距離の内のいずれか一方で定まる常電導転移時の発生電圧とに基づいて、上記各燃りピッチを上記誘導起電力の総和が上記発生電圧よりも小さい条件を満足する範囲に設定した請求項15記載の超電導ケーブル。

【請求項17】 複数本の超電導素線から成る燃線を備えた超電導ケーブルにおいて、上記燃線は同心円の半径が異なる円周方向に層状に同じピッチで燃り合わせて成る複数層の燃線であり、この複数層の燃線の燃りピッチに相当する各交差位置における上記超電導素線の単位長さ当たりの電気抵抗値を上記交差位置を挟む位置における上記電気抵抗値よりも小さくするための電気抵抗を有する電氣的短絡部を当該交差位置に設けたことを特徴とする超電導ケーブル。

【請求項18】 前記複数層の燃線の内の隣接する2つの層の燃線の燃り方向を互いに逆方向に設定した請求項17記載の超電導ケーブル。

【請求項19】 前記複数層の層数は偶数である請求項

4

18記載の超電導ケーブル。

【請求項20】 前記燃線を収納するコンジットを更に備え、前記電氣的短絡部は、当該コンジットの軸方向に直交する上記燃線のボイド率を前記交差位置で小さくする手段を備えた請求項17～19の内のいずれか1項に記載の超電導ケーブル。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、超電導パルスマグネットあるいは交流マグネット等の超電導機器の安定性の確保と交流損失の低減を図るようにした超電導ケーブルに関する。

【0002】

【従来の技術】従来、核融合装置の超電導マグネットや超電導トランス、超電導発電機、固定子巻線、限流器等の超電導機器に使用される超電導ケーブルが知られている。この内、特に超電導パルスマグネット又は交流マグネットに好適な超電導ケーブルを図17に示す。

【0003】図17に示す超電導ケーブル1は、超電導素線2を複数本燃り合せて一次燃線3を構成する一方、この一次燃線3を複数本(束)燃り合せて二次燃線4を構成し、さらに順次同様に燃り合わせて所望の高次燃線を構成し、この高次燃線をコンジット5内に収納している。

【0004】しかしながら、このような高次燃線であってもパルス条件等によっては、超電導ケーブル1の断面方向に超電導素線2間を横切る磁束変化により結合電流が流れ、この結合電流が素線2間を横切る時に生じるジュール発熱による熱損失が大きくなって、常電導化するおそれがあった。

【0005】そこで、超電導ケーブル1に発生する大きな熱損失を防止する対策として、超電導素線2の表面に高抵抗体あるいは電気絶縁体のコーティングを施し、超電導素線2間の電気抵抗を大きくし、交流損失の発生を低減させている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述した素線表面に電気絶縁又は高抵抗化処理を施した超電導ケーブルにあっては、局所入熱等の外乱に起因して一部の超電導素線が常電導転移すると、他の超電導素線も超電導状態を維持できなくなり、その結果、超電導ケーブル自体の安定性(超電導状態を良好に維持すること)が悪くなるといった問題があった。

【0007】即ち、超電導素線間の高抵抗化対策は、各超電導素線に流れる電流に偏りがある場合、あるいは導体断面内に局所的な入熱がある場合には、電流の再配分がスムーズに行なわれず、超電導状態の維持をスムーズにかつ安定的に行なうことができず、超電導ケーブルの安定性を損う原因の1つとなっていた。

【0008】例えば、ワイヤーモーション等の外乱で超

超電導素線の一部が常電導転移した際に、超電導ケーブルが超電導状態を維持するためには、隣接する他の超電導素線に素早く電流を移行させることが重要である。しかし、上述の如く、絶縁処理等により超電導素線間の電気抵抗を大きくしてしまうと、素線間の電流移動（電流再配分）が導体端部の電極を通る経路でしか行われなため、素線長に比例して時間を要し、特に長いケーブルでは素早い電流移動は期待できない。この結果、超電導ケーブルは高い安定性を得ることができず、容易にクエンチする（超電導状態が崩れる）ことがあった。このように、交流損失の低減と安定性の確保とはトレードオフの関係にあり、両者を同時に実現することは困難であった。

【0009】このことは、各超電導素線の長さ（インダクタンス）の差や電流導入端子での接続電気抵抗の違いにより、各超電導素線に流れる電流に偏りが生じる場合にも、同じ理由で安定性の低下が生じ、1本の超電導素線の常電導転移により、超電導ケーブル全体の使用ができなくなる問題があった。

【0010】そこで、このような安定性の確保と交流損失の低減とを同時に志向した超電導ケーブルが近年、提案されている（例えば特開平7-14441号）。

【0011】この超電導ケーブルは、大容量ケーブルやパルスケーブル等に適用されるもので、超電導フィラメント及び銅などの安定化材から成る複数本の超電導素線を備え、この複数の超電導素線を上記と同様に順次燃り合せて一次燃線、二次燃線、…、高次燃線を形成している。この超電導ケーブルは、変動磁界に起因して生じる素線間の結合電流による結合損失（交流損失）を低減する目的で、超電導素線の表面にホルマール等の絶縁体又はCuNi、Cr等の高抵抗体を配した絶縁処理を施すと共に、常電導転移した素線に流れる電流を速やかに分流させてクエンチを防ぎ、安定性を確保する目的で、各素線を電氣的に短絡させる電氣的短絡部を所定間隔毎に形成している。

【0012】しかしながら、この超電導ケーブルにあっても、電氣的短絡部の配置箇所や、そのピッチ、抵抗値等の設計値選定にあたり、必ずしも明確な基準が確立されておらず、また電氣的短絡部の具体的な構成も明らかではなかったため、例えば数百メートルのケーブル長で超電導素線を複数段に燃り合わせる場合等のケーブル使用条件、燃り回数等の運用によっては、どの箇所にもどれだけのピッチでどのようにして電氣的短絡部を設けるのか、その電氣的短絡部の抵抗値をどのように決めるのか等が明らかでなく、実用化が困難となる場合があった。

【0013】本発明は、上述した従来技術の問題を考慮してなされたもので、安定性の確保と交流損失の低減を同時に図ることができる超電導ケーブルを提供することを、第1の目的とする。

【0014】また、電流の再配分性や移行性を向上させ

て超電導状態を安定に維持すると共に、結合電流発生による交流損失を軽減させた超電導ケーブルを提供することを、第2の目的とする。

【0015】さらに、電氣的短絡部を設ける構成の利点を活用しつつ、ケーブル運用に応じた電氣的短絡部の配置箇所、そのピッチ、抵抗値等の最適値選定の基準を構築し、実用性を高めた超電導ケーブルを提供することを、第3の目的とする。また、電氣的短絡部の構成を容易に構築し、実用性を高めた超電導ケーブルを提供することを、第4の目的とする。

【0016】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、請求項1記載の発明に係る超電導ケーブルは、超電導素線を複数本燃り合せて一次燃線を構成し、この一次燃線を複数本燃り合せて二次燃線を構成し、以後順次同様に燃り合せて高次燃線を構成した超電導ケーブルにおいて、燃り次数の同じ燃線間の単位長さ当りの電気抵抗値が、燃り次数が高い燃線間ほど大きな値となるように構成している。

【0017】請求項2記載の発明では、高次燃線の最終燃り次数をNとしたとき、(N-1)次以下の燃り次数を持つ燃線のうち、少なくとも1つの任意次数の燃線外表面に、高抵抗体の被膜を形成したり、また、請求項3に記載したように、高抵抗体の被膜は、燃り次数の低い燃線より燃り次数の高い燃線ほど膜厚を厚く形成したり、さらに、請求項4に記載したように、高抵抗体の被膜は、燃り次数の低い燃線より燃り次数の高い燃線ほど電気抵抗の大きな被膜材料で形成している。

【0018】請求項5記載の発明では、燃線は燃り次数が高くなるに従って燃りピッチが大きくなるように設定されたり、さらに、請求項6に記載したように、一次燃線は、超電導素線の直径をdとしたとき、燃りピッチ $Lp1$ を $Lp1 \leq 20d$ の範囲に設定したり、また、請求項7に記載したように、二次燃線は、一次燃線の外接円の直径をD1としたとき、燃りピッチ $Lp2$ を $Lp2 \leq 30D1$ の範囲に設定するとともに、三次燃線は、二次燃線の外接円の直径をD2としたとき、燃りピッチ $Lp3$ を $Lp3 \leq 40D2$ の範囲に設定している。

【0019】請求項8記載の発明では、高次燃線の構成後、高次燃線に臨界荷重以下の引張荷重を印加させて燃線間を圧着させたり、また、請求項9に記載したように、燃りピッチが Lpn で燃り次数がNの高次燃線は、(N-1)次の燃線間の電気抵抗が、燃りピッチ $Lp1$ の一次燃線の超電導素線間の電気抵抗の $(Lpn/Lp1)$ の2乗倍以上に設定したものである。

【0020】請求項10記載の発明では、超電導素線を複数本燃り合せて一次燃線を構成し、この一次燃線を複数本燃り合せて二次燃線を構成し、以後順次同様に燃り合せて高次燃線を構成した超電導ケーブルにおいて、上記高次燃線を不活性ガスあるいは真空中で昇温させて燃

10

20

30

40

50

7

りの交差部を固相拡散接合し、電気的短絡部を形成している。

【0021】請求項1記載の発明に係る超電導ケーブルは、複数本の超電導素線から成る燃線と、この燃線の燃りピッチの整数倍に相当する当該燃線の交差位置における上記超電導素線の単位長さ当たりの電気抵抗値を上記交差位置を挟む位置における上記電気抵抗値よりも小さくするための電気抵抗を有する電気的短絡部とを備え、この電気的短絡部を上記交差位置に設けている。

【0022】ここで、上記超電導素線の長手方向の熱拡散距離を l_d とし、当該超電導素線の熱伝導率及びその熱容量を κ 及び ρC とし、当該超電導素線に対し外乱の加わる時間を τq としたとき、上記熱拡散距離 l_d を、

【数5】

$$l_d = 2 \sqrt{\frac{\kappa}{\rho C} \cdot \tau q}$$

の式で求め、且つ、上記電気的短絡部の電気抵抗値を R_c とし、上記超電導素線の常電導転移時における単位長さ当たりの電気抵抗値を R_n とし、当該超電導素線の超電導特性及びその冷媒条件で定まる制限電流値及び臨界電流値を I_{lim} 及び I_c としたとき、上記電気的短絡部の電気抵抗値 R_c を、

【数6】

$$2R_c / (2R_c + R_n \times l_d) \leq I_{lim} / I_c$$

の条件式を満たす範囲に設定している。

【0023】請求項1記載の発明に係る超電導ケーブルは、複数本の超電導素線から成る燃線と、この燃線の長手方向に沿って一定間隔毎に配置した位置における上記超電導素線の単位長さ当たりの電気抵抗値を上記配置位置を挟む位置における上記電気抵抗値よりも小さくするための電気抵抗を有する電気的短絡部とを備え、この電気的短絡部を上記配置位置に設けている。

【0024】ここで、上記電気的短絡部間の距離を l_c とし、上記超電導素線の長手方向の熱拡散距離を l_d とし、当該超電導素線の常電導転移時における電気抵抗値を R_n とし、上記電気的短絡部の電気抵抗値を R_c とし、上記常電導転移した上記超電導素線及びこの超電導素線に隣接する超電導状態を維持している超電導素線の互いのインピーダンス特性で定まる単位長さ当たりの漏れインダクタンスを L とし、上記超電導素線の電気抵抗値 R_n 、上記電気的短絡部の電気抵抗値 R_c 、及び上記漏れインダクタンス L で定まる回路時定数を τc とし、上記超電導素線に対し過渡熱伝達が支配する時間を τh としたとき、上記熱拡散距離 l_d が上記電気的短絡部間の距離 l_c よりも小さいとき($l_d < l_c$)、当該電気的短絡部間の距離 l_c を、

【数7】

$$\tau c = (L \cdot l_c) / (R_n \cdot l_d + 2R_c) < \tau h$$

の条件式を満たす範囲に設定すると共に、上記熱拡散距

8

離 l_d が上記電気的短絡部間の距離 l_c よりも大きいとき($l_d > l_c$)、当該電気的短絡部間の距離 l_c を、

【数8】

$$\tau c = (L \cdot l_c) / (R_n \cdot l_c + 2R_c) < \tau h$$

の条件式を満たす範囲に設定している。

【0025】請求項1記載の発明では、前記燃線は、前記複数本の超電導素線を互いに燃り合わせて成る一次の燃線及びこの一次の燃線を互いに燃り合わせて成る二次の燃線を含む高次燃線であり、この高次燃線の内の各次の燃線における各燃りピッチの最小公倍数が前記電気的短絡部間の距離と等しくなる条件で上記各燃りピッチを設定している。

【0026】請求項1記載の発明では、前記高次燃線の各次の各燃りピッチの最小公倍数が前記電気的短絡部間の距離よりも大きいとき、上記高次燃線の内の一次から任意次数までの燃線の各燃りピッチの最小公倍数が上記電気的短絡部間の距離よりも小さくなる時の上記一次から任意次数までの燃線に上記電気的短絡部を設けている。

【0027】請求項1記載の発明に係る超電導ケーブルは、複数本の超電導素線から成る燃線を備えた構成とし、上記超電導素線に対して外部磁界の変化に起因して生じる誘導起電力と、上記燃線の燃りピッチ及び上記超電導素線の長手方向の熱拡散距離の内のいずれか一方で定まる当該超電導素線の常電導転移時の発生電圧とに基づいて、上記燃りピッチを上記誘導起電力が上記発生電圧よりも小さい条件を満足する範囲に設定している。

【0028】請求項1記載の発明では、前記燃線は、前記複数本の超電導素線を互いに燃り合わせて成る一次の燃線及びこの一次の燃線を互いに燃り合わせて成る二次の燃線を含む高次燃線であり、この高次燃線の各次の燃線毎の前記誘導起電力の総和と、当該各次の燃線の各燃りピッチ及び前記熱拡散距離の内のいずれか一方で定まる常電導転移時の発生電圧とに基づいて、上記各燃りピッチを上記誘導起電力の総和が上記発生電圧よりも小さい条件を満足する範囲に設定している。

【0029】請求項1記載の発明に係る超電導ケーブルは、複数本の超電導素線から成る燃線を備えた構成とし、当該燃線は同心円の半径が異なる円周方向に層状に同じピッチで燃り合わせて成る複数層の燃線であり、この複数層の燃線の燃りピッチに相当する各交差位置における上記超電導素線の単位長さ当たりの電気抵抗値を上記交差位置を挟む位置における上記電気抵抗値よりも小さくするための電気抵抗を有する電気的短絡部を当該交差位置に設けている。

【0030】請求項1記載の発明では、前記複数層の燃線の内の隣接する2つの層の燃線の燃り方向を互いに逆方向に設定している。

【0031】請求項1記載の発明では、前記複数層の層数は偶数である。

50

【0032】請求項20記載の発明では、前記燃線を収納するコンジットを更に備え、前記電氣的短絡部は、当該コンジットの軸方向に直交する上記燃線のボイド率を前記交差位置で小さくする手段を備えている。

【0033】

【発明の実施の形態】

(第1実施形態)以下、本発明の第1実施形態について添付図面を参照して説明する。

【0034】図1は本発明に係る3×3×3型超電導ケーブル10の代表例を示す斜視図である。この超電導ケーブル10は、核融合装置の超電導マグネット、超電導発電機、超電導トランス、固定子巻線、限流器等の超電導機器に用いられる超電導燃線導体である。この超電導ケーブル10は超電導パルスマグネットや交流マグネット用に好適に用いられる多重燃線構造の超電導燃線導体である。超電導ケーブル10が核融合装置の超電導マグネット用に使用される場合には、ヘリウム冷媒等を充填したコンジット5(図8参照)内に収容され、他の超電導機器に使用される場合には、絶縁スペーサで被覆される。

【0035】超電導ケーブル10は例えば直径数mm程度の多重燃線構造の超電導燃線導体であり、高次(N次: $N \geq 2$)の燃り次数を持つ燃線から構成される。図1に示された超電導ケーブル10は、3次の燃り次数を有する超電導燃線導体であり、超電導素線11、一次燃線12、二次燃線13、および三次燃線14から構成される。

【0036】超電導素線11には、ヒステリシス損失を低減するために、例えば数 μm 程度の同一径の超電導フィラメントを多数本、具体的には数万本備えた超電導多芯線が用いられる。超電導素線11は1mm ϕ 以下、例えば0.2mm ϕ 程度の外径を有する。超電導素線を構成する超電導多芯線には、多芯線軸に垂直な磁界(横磁界)に対する超電導フィラメント間の電磁氣的結合やこの結合に伴う電磁損失(フィラメント間結合損失)を抑制するために、通常燃り(ツイスト)が施される。各超電導フィラメントはNbTiやNb₃Sn等の超電導材料をCuNi等の安定化銅で被覆して構成される。

【0037】超電導フィラメントを燃り合せて構成された超電導多芯線のフィラメント部の外周にシース部が必要に応じて設けられ、このシース部は酸化銅、クロム、CuNi等の高抵抗体あるいは銀等の低抵抗体の被膜で形成される。

【0038】また、超電導ケーブル10の一次燃線12は超電導素線11を複数本、例えば3本燃り合せて構成される一方、燃り合された一次燃線12をさらに複数本(束)燃り合せて二次燃線13が構成される。さらに、燃り合された二次燃線13を複数本(束)燃り合せて三次燃線14が構成され、この三次燃線14により三次の燃り次数を有する超電導ケーブル10が構成される。各

燃線12、13、14の燃りピッチは燃り次数が高くなるに従って大きくなるように設定される。超電導ケーブル10は燃り次数がN($N \geq 2$)の燃線で構成され、一般的には、燃り次数Nは6~8であることが多い。

【0039】一方、この超電導ケーブル10は図2に示すように、一次燃線の外表面に薄い一次コーティング材16が電気抵抗体として被着(コーティング)される。一次コーティング材16が施された一次燃線12を複数本燃り合せた二次燃線13の外表面にも電気抵抗体として二次コーティング材17が被着される。また、二次燃線13を燃り合せた三次燃線14の外表面にも三次コーティング材18が被着される。各コーティング材16、17、18はクロム、酸化銅、CuNi、ステンレス、タングステン、ニッケル、硫化銅、ホルマール、アモルファス合金、窒化アルミ等の高抵抗体材料あるいは半導体等の抵抗体材料で形成される。三次コーティング材18は四次燃線(図示せず)のための被膜である。なおホルマールのコーティング厚さは数 μm 程度が望ましい。

【0040】各コーティング材16、17、18はスパッタリング、電気メッキ、焼付け塗布、溶射、どぶ付け等で対応する燃り次数の燃線12、13、14にコーティングされる。スパッタリング等でコーティングすると、各燃り次数の燃線12、13、14の外接円側の外表面にだけ良好な所定膜厚のコーティング(被膜)が施され、コーティング材が燃線の内部に回り込んで侵入することがないので、コーティング表面積が小さくコーティング材料の節約が図れる一方、一次燃線12を構成する超電導素線11間の接点にはコーティング材が施されず、超電導素線11同士を相互に直接接触させることができ、超電導素線11間の電気抵抗を極めて小さくし、隣接する超電導素線11への電流配分(再分配)あるいは電流移行がスムーズになり、高い安定性が得られる。安定性とは超電導状態を崩すことなく、超電導状態を良好に安定して維持できる性質をいう。

【0041】各燃り次数の燃線12、13、14の外表面に形成されるコーティング材16、17、18の膜厚は、燃り次数が高くなる高次の燃線ほど厚く形成され、高次の燃線間の単位長さ当たりの電気抵抗値が低次側の燃線間の電気抵抗値より大きく設定される。高次側の燃線の電気抵抗値を低次側燃線の電気抵抗値より大きくすることで、高次側燃線間の電気抵抗値を大きくあるいは絶縁状態とすることができ、交流による交番磁界によって生じる外部磁場の変化に伴い超電導ケーブル10の断面内に誘起される磁束の変化に起因した渦電流の大きなパス(経路)を無くすることができ、渦電流の発生に伴う交流損失を低減させることができる。低次側の燃線、例えば一次燃線12は外表面にコーティングが施され、超電導素線11同士は直接接触するので、電気抵抗が極めて小さく、磁束の変化により渦電流が発生しても、鎖交する磁束が小さいので、交流損失は極めて小さい。

11

【0042】次に超電導ケーブル10における一次、二次および三次の燃線12、13、14の燃りピッチ(ツイストピッチ)と超電導素線(燃線)間の接触電気抵抗の関係を図3に示す。

【0043】この図3から燃りピッチが短いほど素線間あるいは燃線間の接触電気抵抗が小さくなっていくことがわかる。具体的には、(一次燃線12の燃りピッチ L_{p1} /超電導素線径 d)と(超電導素線11間の電気抵抗)との関係を符号 a で示す。符号 b は二次燃線13の(燃りピッチ L_{p2} /一次燃線外接円径 $D1$)と(一次燃線12間の電気抵抗)との関係を示し、符号 c は(三次燃線14の燃りピッチ L_{p2} /二次燃線外接円径 $D2$)と(二次燃線13間の電気抵抗)との関係をそれぞれ示している。

【0044】一次燃線12では符号 a に示すように燃りピッチ L_{p1} が超電導素線径 d のほぼ20倍以下になると素線間電気抵抗が急激に減少し、15倍程度以下になると、超電導素線11の燃り状態がタイトされることがわかる。すなわち、一次燃線12では燃りピッチ L_{p1} が超電導素線径 d のほぼ20倍を超えると燃りがルーズになり、15倍より少ないと燃りがタイト状態となる。図3から、一次燃線12の場合には、燃りピッチ L_{p1} が超電導素線径 d のほぼ20倍以下、好ましくは $15 \leq L_{p1}/d \leq 20$ にあることが望ましい。

【0045】また、図3を参照すると、二次燃線13の場合には、燃りピッチ L_{p2} が一次燃線12の外接円径 $D1$ のほぼ30倍以下になると、一次燃線12間の電気抵抗が急激に減少し、また、25倍以下になると二次燃線13を構成する一次燃線12の燃り状態がタイトされることがわかる。したがって、二次燃線13の場合には、燃りピッチ L_{p2} が一次燃線12の外接円径 $D1$ のほぼ30倍以下、好ましくは $25 \leq L_{p2}/D1 \leq 30$ の範囲にあることが望ましい。三次燃線14の場合にも、同様に、燃りピッチ L_{p3} が二次燃線13の外接円径 $D2$ のほぼ40倍以下、好ましくは $35 \leq L_{p3}/D2 \leq 40$ の範囲にあることが望ましい。

【0046】一般的には、図3から超電導ケーブル10は燃線の燃り次数が小さくなるほど燃りピッチを小さくしていけば、超電導素線間あるいは該当する燃り次数の燃線間の接触電気抵抗が小さくなって、隣接する超電導素線11あるいは低圧側燃線への電流分配あるいは電流移行がスムーズに行なわれ、超電導状態の維持、すなわち安定性の確保が図れる。

【0047】具体的に、超電導ケーブル10の各燃線12、13、14のうち、一次燃線12を構成する超電導素線11間は接点を介して直接接触しており、電気的結合力が強く、超電導素線11間の電気抵抗が小さい。このため、超電導ケーブル10に何らかの原因で、例えば局所的な入熱により超電導ケーブル10を構成する超電導素線11の1本が常電導に移ると、常電導に移した

12

超電導素線11に隣接する周辺の複数本の超電導素線11に多くの電流が素早く移行し、常電導に移した超電導素線11のジュール発熱を減少させ、この素線11を再び超電導状態に回復させることができる。すなわち、燃り次数の小さな一次燃線12では超電導素線11間の電気的結合力が強く、相互インダクタンスが大きく、超電導状態を維持する隣接する周辺の超電導素線との間に生じる迅速な電流移行性や電流再配分性により、常電導状態の超電導素線11に流れる電流を関連する隣接の超電導素線に素早く案内し、再び超電導状態に維持することができるので、安定性の向上を図ることができる。

【0048】したがって、より小さな素線間電気抵抗を得たい一次燃線12では、燃りピッチ L_{p1} を超電導素線径 d の20倍以下、すなわち $L_{p1}/d \leq 20$ に設定することで、超電導素線11間に良好な電気接触を確保し、高い安定性を維持することができる。超電導ケーブル10は一般には燃り次数の高い6次あるいは7次の燃線が用いられ、この高次の燃線が使用される場合、二次および三次燃線13、14は交流損失の増加に関与しないので、低次側の燃線となる。二次燃線13および三次燃線14程度までの低次側燃線は一次燃線12と同様に、燃線間の電気抵抗を小さく保持することが好ましい。このためには、二次燃線13の場合には燃りピッチ L_{p2} を一次燃線12の外接円径 $D1$ の30倍以下、三次燃線14の場合には燃りピッチ L_{p3} を二次燃線13の外接円径 $D2$ の40倍以下にすることで、安定性を向上させ、交流損失の少ない超電導ケーブルが得られる。

【0049】一方、燃り次数の小さな燃線、すなわち低次側燃線における交流損失をさらに減らすためには、従来の図8に示す超電導ケーブルと同様に、超電導素線に電気絶縁あるいは高抵抗体のコーティングを行ない、燃りピッチの整数倍毎に電気的短絡部(接触部)を設けることで、電流再配分が起こる電気回路を小さなもの(小ループ)に形成でき、迅速な電流再配分や電流移行性を確保することができる。燃りピッチの整数倍毎に電気的短絡部を設けることで、超電導素線間の結合損失を完全になくすることができる。例えば、一次ないし三次燃線12、13、14のいずれかの段階で燃りピッチの整数倍の電気的短絡部を設けることで、交流損失を増加させることなく電流の再配分を迅速に行なうことができる。この場合、超電導素線を電気絶縁体あるいは高抵抗体材料のコーティング材で被覆してもよい。

【0050】本発明の一実施例では、超電導ケーブル10の各燃線に被着されるコーティング材16、17、18に同種の高抵抗体材料を用い、コーティング材の肉厚(層厚)を変化させることで高次側燃線間の電気抵抗を大きくし、絶縁効果を挙げるようにした例を示したが、図4に示すように、コーティング材に電気抵抗の異なる高抵抗体材料あるいは絶縁材料を用いてもよい。

【0051】図4に示された超電導ケーブル10Aでは

13

燃線の燃り次数が高くなるに従って一次コーティング材20より電気抵抗が大きく、あるいは高い高抵抗体材料のコーティング材21、22を用いてコーティングしてもよい。電気抵抗を異にする高抵抗体あるいは絶縁体のコーティング材を用いた場合には、各コーティング材20、21、22の膜厚(層厚)を必ずしも変化させる必要がない。

【0052】また、超電導ケーブル10は高次の燃線を燃り合せて構成した後、この高次燃線に臨界荷重以下の引張荷重を印加させて高次燃線の燃線同士を圧着(密着)させてもよい。超電導ケーブル10の高次燃線にプリテンションを作用させることで、フレキシビリティをなくし、低次側燃線において、燃りピッチを大きくしても燃線間の電気抵抗を小さくした超電導ケーブルが得られる。

【0053】さらに、超電導ケーブル10は、ケーブル断面(導体断面)内に任意の超電導素線間に生じる渦電流に伴う交流損失は、燃りピッチの比の2乗に比例することを考慮して、燃り次数がN次の超電導ケーブルを次のように構成してもよい。

【0054】すなわち、超電導ケーブル10は、燃りピッチが L_{pn} で燃り次数がNの高次燃線における(N-1)次の燃線間の電気抵抗が、燃りピッチ L_{p1} の一次燃線の超電導素線間の電気抵抗の(L_{pn}/L_{p1})の2乗倍以上に設定することにより、各次数の燃線で発生する渦電流損失を均等化し、交流損失の低減を図ることができる。

【0055】図5は、本発明に係る超電導ケーブル10Bの他の変形例を示すものである。

【0056】この変形例に示された超電導ケーブル10Bは一次燃線12の外表面にコーティング材を被着せず、一次燃線12を燃り合せた二次燃線13の外表面に電気抵抗体として高抵抗体の一次コーティング材23を初めて被着させたものである。

【0057】この超電導ケーブル10Bでは、一次燃線12の外表面にコーティング材を被着させないので、超電導素線11同士の直接接触を有効に図ることができるのみならず、高抵抗体がコーティングされていない一次燃線13同士の直接接触を図ることができ、超電導素線11間や一次燃線12間の電気抵抗値を小さくとることができ、電流の分配が容易であるとともに、二次燃線13間の電気抵抗値を大きくとることができ、高次側燃線間の電気抵抗を大きくして交流損失を低減させることができる。

【0058】また、超電導ケーブル10Bは最終燃り次数Nの高次燃線に高抵抗体あるいは絶縁体材料のコーティング材で被覆してもよいが、超電導ケーブル10Bは図8に示すコンジット5内に収納されるのでコーティング材を施さなくてもよい。

【0059】この超電導ケーブル10Bにおいては、燃

14

線の最終燃り次数をNとしたとき、(N-1)次以下の燃り次数を持つ燃線のうち、少なくとも1つの任意次数の燃線が表面に高抵抗体材料のコーティング材23で被覆すればよい。

【0060】この場合には、高抵抗体の被膜(コーティング材23)が施された所要次数の燃線内の超電導素線11同士や低次側燃線間同士に被膜が施されず、相互に直接接触するため、素線間や低次側燃線間の電気抵抗が極めて小さく、電流の再配分性や移行性を十分に確保できる。

【0061】さらに、高抵抗体被膜が施された燃線より高次の燃線では、この高次燃線間の電気抵抗が被膜の存在より大きいので、燃線間の電気抵抗や絶縁性を増大させ、渦電流損失に伴う交流損失を有効的に軽減させることができる。

【0062】さらに、超電導ケーブルは一次燃線12より数段階の燃り次数の低い低次側燃線にコーティング材を施さず、この低次側燃線を燃り合せた次段の燃線からコーティング材を施すようにしてもよい。

【0063】また、超電導ケーブルは、超電導素線11の外表面に低抵抗体材料、例えば銀メッキを被着し、この低抵抗体を被着した超電導素線11を燃り合せて一次燃線12を構成し、この一次燃線12に電気抵抗体の一次コーティング材を被着(コーティング)させ、高抵抗体の被膜を形成し、二次燃線13より高次側の燃線14に図2および図4に示すように順次コーティング材を施してもよい。

【0064】また、超電導素線11に銀メッキをする代わりに、超電導素線11の多芯線を構成する超電導フィラメント群を覆うシース部や超電導フィラメント(超電導材料のNbTi材やNb₃Sn材をCuNi等の安定化銅で被覆したもの)の安定化銅を酸洗浄等で除去して活性化させておき、活性化された超電導素線11を複数本燃り合せて一次燃線を構成し、さらにこの一次燃線12を複数本燃り合せて二次燃線13を構成し、さらにまた、二次燃線13を複数本燃り合せて三次燃線14を構成し、三次燃線14を燃り合せた後に、高抵抗体のコーティング材で外表面をコーティングし、続いて不活性ガス雰囲気や真空中で数100℃~1000℃程度で熱処理を行ない、高抵抗体のコーティング材がコーティングされていない低次側燃線内のち素線11同士が接触している箇所を固相拡散接合により融着させて電氣的短絡部を形成してもよい。

【0065】超電導ケーブルをこのように構成し、低次側燃線内の超電導素線同士の燃りの交差部を固相拡散接合することで、燃り次数の低い燃線の超電導素線間の電気抵抗を著しく低くすることができ、また燃り次数の大きな燃線間はコーティング材が介装されているので、電気抵抗を大きく形成できる。

【0066】なお、本発明の第1実施形態では、超電導

15

ケーブルは $3 \times 3 \times 3$ 型の三重燃線構造の超電導燃線導体を構成した例を示したが、本発明はこれに限定されるものではない。例えば、超電導ケーブル10Cを、図6に示す $6 \times 6 \times 6$ 型の多重燃線構造の超電導燃線導体で形成してもよい。

【0067】すなわち、この超電導ケーブル10Cは超電導素線11を6本撚り合せて一次燃線25を構成し、続いて一次燃線25を6本撚り合せて二次燃線26を構成し、この二次燃線26を6本撚り合せて三次燃線27を構成したものである。さらに三次燃線27を以後順次同様に撚り合せて4次以上の多重燃線構造としてもよい。この場合、多重燃線の各レベルの中心に補強用芯線として非超電導線28、29、30が配置されるが、この非超電導線に代えて超電導線を使用することにより、 $6 \times 6 \times 6$ 型の多重燃線導体を $7 \times 7 \times 7$ 型多重燃線導体とすることもできる。

【0068】また、超電導ケーブル10Dは、図7に示すように矩形燃線導体としても、さらに、他の形状の燃線導体構造としてもよい。

【0069】図7に示す矩形の超電導ケーブル10Dは、6本（あるいは7本）の超電導素線11を撚り合せて一次燃線25を構成し、この一次燃線25を矩形断面の補強用芯材としての非超電導線32の周りに多数本巻き付けて二次燃線33を構成したものであるが、非超電導線32の周りに三次以上の撚り次数の燃線を巻き付けるようにしてもよい。

【0070】（第2実施形態）次に、本発明の第2実施形態を図8～図10に基づいて説明する。この第2実施形態は、撚りピッチの整数倍毎に電気的短絡部を設けた超電導ケーブルに適用したもので、電気的短絡部の抵抗値及びその距離（配置間隔）などの最適値選定の条件を具体的に規定している。

【0071】まず、電気的短絡部の抵抗値の設定例を図8に基づいて説明する。

【0072】図8は、撚りピッチ毎に電気的短絡部を設けた超電導ケーブルにおける抵抗値の設定例を説明するグラフで、横軸に短絡抵抗値 R_c （ Ω ）と常電導抵抗値 $R_n \times l_d$ （ Ω ）とで定まる抵抗比（ $2R_c / (2R_c + R_n \times l_d)$ ）を設定し、縦軸に常電導転移時に流れる電流値 I と臨界電流値 I_c との電流比（ I / I_c ）を設定し、この両者の関係に制限電流値 I_{lim} を加味して短絡抵抗値 R_c を求めるものである。

【0073】「常電導抵抗値 $R_n \times l_d$ 」は、超電導素線が完全に常電導転移した時に発生する単位長さ当たりの抵抗値 R_n （ Ω/m ）と、超電導素線の長手方向の熱拡散距離 l_d （m）との積で表される抵抗値である。

「熱拡散距離 l_d 」とは、ワイヤーモーション等の外乱が加わる短時間（例えば、約1ms）の間に、超電導素線に発生した熱が冷媒に対して断熱的に熱拡散すると仮定したときに素線長手方向に発生する常電導領域（温度

16

上昇領域）の長さを意味する。

【0074】具体的には、局所加熱等の局所的に発生した外乱が超電導素線に加わる時間（ τ_q ）に対する素線長手方向の温度上昇領域の長さ、即ち熱拡散距離 l_d は、超電導素線の長手方向の熱伝導率及びその熱容量を κ 及び ρC としたとき、

【数9】

$$l_d = 2 \sqrt{\frac{\kappa}{\rho C} \cdot \tau_q}$$

の式で表される。この【数9】式中の κ 及び ρC については、超電導素線の表面における絶縁被膜の熱絶縁性が良好な場合には、超電導素線の構成材料の熱伝導率及び熱容量を採用する。ただし、超電導素線の表面に絶縁体等が存在せずに熱遮蔽が殆ど行われない場合には、 κ については超電導素線の構成材料（安定化材）、例えば安定化銅の熱伝導率を用い、 ρC については1本の超電導素線に配分される冷媒の熱容量（例えば、超臨界ヘリウムの場合には、素線の周囲約 $30 \mu m$ に配分される熱容量）を用いることが望ましい。

【0075】例えば、ケーブル・イン・コンジット型の強制冷却導体を例に上げると、ワイヤーモーション等の外乱（局所加熱）が加わる時間は約1msであり、その局所加熱に対する素線加熱部の熱拡散距離 l_d は、線径が1mm、銅比（超電導フィラメントの総断面積に対する銅（安定化銅）の比率）が2の超電導素線の場合、上記【数9】式から求めると、約100mmとなる。この超電導素線では、常伝導転移時に発生する抵抗値 R_n は、単位長さ当たり $0.5 m\Omega/m$ 程度であるため、 $l_d = 0.1 m$ 、 $R_n = 0.5 m\Omega/m$ とすると、外乱で発生する常電導抵抗値 $R_n \times l_d$ は、 $50 \mu\Omega$ となる。

【0076】「制限電流値 I_{lim} 」とは、超電導素線の常電導転移時に単位長さ当りに発生するジュール発熱量（ $R_n \times I^2$ ）と超電導素線の周囲に配置した冷媒が定常的に奪うことができる熱量（ $h \times A \times (T_c - T_b)$ ）とが等しくなるときの電流値（Steklyの条件に基づく制限電流値）を意味する。ここで、熱量を求める式中の h は冷媒の定常熱伝達率、 A は冷媒と超電導素線が接する単位長さ当りの表面積、 T_c は超電導素線の臨界温度、 T_b は冷媒の温度である。

【0077】従って、常電導転移した超電導素線を再び超電導状態へ安定化させる条件としては、常電導転移した超電導素線に流れる電流値 I が制限電流値 I_{lim} よりも定常的に小さいことが必要となる。

【0078】そこで、電流値 I が制限電流値 I_{lim} となるときの電流比 R_y （ I_{lim} / I_c ）と、常電導抵抗値 $R_n \times l_d$ 及び短絡抵抗値 R_c で定まる抵抗比 R_x （ $2R_c / (2R_c + R_n \times l_d)$ ）との関係に着目し、その抵抗比 R_x が電流比 R_y 以下となる条件、即ち、

【数10】

$$2R_c / (2R_c + R_n \times l_d) \leq I_{lim} / I_c$$

の条件式を満足する範囲に短絡抵抗値 R_c を設定した。

【0079】このように短絡抵抗値 R_c を設定すると、超電導転移した超電導素線に流れる電流の多くが隣接する常電導状態を維持している超電導素線側に容易に分流し、常電導抵抗によるジュール発熱を抑制するため、外*

$$2R_c / (2R_c + R_n \times l_d) \leq 1/2$$

$$2R_c \leq R_n \times l_d$$

の条件式が得られる。従って、 $I_{lim}/I_c = 1/2$ の場合には、常電導抵抗値 $R_n \times l_d$ が短絡抵抗値 R_c の2倍以上となる範囲に短絡抵抗値 R_c を設定することで、上記と同様の効果を発揮させることができる。なお、【数11】式の条件で十分な移行電流を得るためには、 $2R_c$ を $R_n \times l_d$ の約 $1/5$ 以下、即ち短絡抵抗値 R_c を素線の常電導抵抗値($R_n \times l_d$)の約 $1/10$ 以下に設定することが望ましい。

【0081】次に、電気的短絡部間の距離の設定例を図9及び図10に基づいて説明する。

【0082】図9は、超電導素線間の電気回路(等価回路)を用いて、超電導素線からの移行電流を模式的に説明するものである。同図に示す回路構成においては、外乱に起因して常電導転移した素線30とその素線30に隣接する超電導状態を維持している素線31との間に電気的短絡部32、32が所定間隔、即ち距離 l_c で接続されている。

【0083】ここで、素線30の常電導転移時には、2つの短絡部32、32間を2つの素線30、31を介してループ状に流れる移行電流 i_3 が発生する。この移行電流 i_3 は、常電導転移した素線30側で電流 i_1 と逆方向に流れ、超電導状態を維持している素線31側では電流 i_2 と同じ方向に流れる。つまり、常電導転移した素線31に流れる電流 i_1 が、並列に接続された素線31の常電導抵抗($R_n \times L_d$)と2つの短絡部32、32の合成電気抵抗($2R_c$)との抵抗比に応じて分流通る回路と等価となる。

【0084】なお、上述した安定条件は、図9に示す回路では、常電導転移した素線31に流れる電流 i_1 を常電導抵抗($R_n \times L_d$)側よりも短絡部32、32の合成電気抵抗($2R_c$)側に多く分流通させるための条件を規定したものである。

【0085】図10は、上記の短絡部間の距離 l_c を変化させたときの上記回路構成に基づく回路時定数 τ_c (sec)と冷媒への熱拡散時定数 τ_h (sec)との関係を比較するためのグラフで、横軸に短絡部間の距離 l_c を設定し、縦軸に回路時定数 τ_c を設定し、回路時定数 τ_c が熱拡散時定数 τ_h よりも小さくなる条件($\tau_c < \tau_h$)を満たすように短絡部間の距離 l_c を求めるものである。

*乱等に対する超電導ケーブルの安定性を大幅に向上させることができる。

【0080】なお、制限電流値 I_{lim} と臨界電流値 I_c とで定まる電流比 R_y (I_{lim}/I_c)は、大容量導体の場合、 $1/2$ 程度となるため、 $I_{lim}/I_c = 1/2$ とし、これを【数10】式に代入すると、

【数11】

※【0086】「回路時定数 τ_c 」は、通常、超電導素線の単位長さ当たりの常電導時の抵抗値 R_n と、超電導素線の単位長さ当たりの漏れインダクタンス L (H/m)と、短絡部の電気抵抗値 R_c とで定まる。「熱伝達時定数 τ_h 」とは、冷媒の伝達能力が定常状態のときと比べて大きな値を維持できる時間をいう。「漏れインダクタンス L 」は、図9に示す回路において、常電導転移した素線30の自己インダクタンス L_1 と、超電導状態を維持している素線31の自己インダクタンス L_2 と、両者30、31の相互インダクタンス M とで決定される(即ち、 $L = L_1 + L_2 - 2M$)。

【0087】図10に示すように、短絡部間の距離 l_c が超電導素線の長手方向の熱拡散距離 l_d よりも小さい範囲($l_d > l_c$)では、回路時定数 τ_c は熱拡散距離 l_d の変化に関係なくほぼ一定値を維持すると共に、短絡部間の距離 l_c が熱拡散距離 l_d よりも大きい範囲($l_d < l_c$)では、回路時定数 τ_c は距離 l_c に比例して大きくなる。

【0088】従って、短絡部間の距離 l_c を求めるときに、回路時定数 τ_c を決定する超電導素線の常電導抵抗値として、単位長さ当たりの抵抗値 R_n と、短絡部間の距離 l_c および熱拡散距離 l_d の内の小さい方の積で求める値($l_d < l_c$ のときは $R_n \cdot l_d$ 、 $l_d > l_c$ のときは $R_n \cdot l_c$)を採用することで、冷媒が過渡熱伝達を支配する時間内、即ち冷媒の冷却能力が大きい時間内に素早く電流移行が行われる。このことを式で表現すると、 $l_d < l_c$ のときは、

【数12】

$$\tau_c = (L \cdot l_c) / (R_n \cdot l_d + 2R_c) < \tau_h$$

の条件式で表され、 $l_d > l_c$ のときは、

【数13】

$$\tau_c = (L \cdot l_c) / (R_n \cdot l_c + 2R_c) < \tau_h$$

の条件式で表される。従って、この実施形態では、【数12】式又は【数13】式で示す安定条件を満足する範囲に短絡部間の距離 l_c を設定する。

【0089】例えば、温度が5K以下の超臨界ヘリウムを冷媒に用いた核融合装置等に適用される超電導ケーブルを例に上げると、超臨界ヘリウムによる過渡的な熱伝達能力が定常状態のそれと比べて大きな値を維持できる時間、即ち熱伝達時定数 τ_h は約10msである。

【0090】この超電導ケーブルでは、超電導素線間のインダクタンス L が 5×10^{-7} (H/m)である。このインダクタンス L は、例えばケーブル・イン・コンジット型の強制冷却導体等の超電導素線、即ち線径が0.6~1.0mm程（この内、超電導フィラメントが存在する領域*

*の外径は0.4~0.8mm程）の場合、素線（又は燃線）間の中心距離を d とし、超電導フィラメントの存在領域の有効半径を a としたとき、

【数14】

$$L = L1 + L2 - 2M = 0.4 \left(\log \left(\frac{d}{a} \right) + \frac{1}{4} \right) \quad (\mu H / m)$$

の式で求め、約0.5 μ H/m以下となる。

【0091】また、この超電導ケーブルでは、通常、常電導抵抗値 $Rn \cdot ld$ が約50 $\mu\Omega$ である。従って、短絡抵抗値 Rc を常電導抵抗値 $Rn \cdot ld$ に比べ十分に小さいと仮定した場合、短絡部間の距離 lc は、上記【数12】式から $\tau c = (L \cdot lc) / (Rn \cdot ld) \leq 10ms$ の条件を満たす範囲、即ち約1m以下となる。この範囲に距離 lc を設定することで、熱伝達能力の減衰時間に対して十分早い時間内に電流移行が得られる。

【0092】また、冷媒が大気圧の液体ヘリウムの場合には、熱伝達時定数 τh は約100msであるため、上述と同様に短絡部間の距離 lc を求めると、約10m以下となり、超臨界ヘリウムと比べ約10倍となる。

【0093】以上のように、電氣的短絡部の抵抗値及びその電氣短絡部間の距離を設定したため、素線の一部が常電導転移した場合でも超電導状態を維持している別の超電導素線に容易に電流を移行させることができ、これにより、高い安定性を得ることができると共に、磁場変動に起因する素線間結合損失も電氣的短絡部間で形成される回路内で相殺できるため、低交流損失の導体を同時に実現できる。

【0094】次に、上記で求めた電氣的短絡部の抵抗値及びその電氣的短絡部間の距離に基づく安定条件を高次燃線に適用する場合を説明する。

【0095】まず、前述した高次燃線構造の超電導ケーブルでは、燃りピッチが各次数の燃線毎に異なる場合がある。この場合には、上記で求めた電氣的短絡部間の距離 lc が各次数の燃りピッチの最小公倍数の距離 $Lmin$ となるように各次数の燃りピッチを設定することで、全ての次数の燃線において上記の安定条件を満たすことができる。

【0096】また、大容量多重燃線などの超電導ケーブルでは、燃りピッチの長い最終燃り次数の燃線まで上記の安定条件を適用することが困難な場合がある。この場合には、全ての次数の燃線ではなく、 $Lmin < lc$ の条件を満たす燃り次数の燃線までに電氣的短絡部を設ける。

【0097】即ち、全ての次数の燃線における最小公倍数 $Lmin$ が上記で求めた電氣的短絡部間の距離 lc よりも大きくなると、一次から任意次数までの最小公倍数を求め、その最小公倍数が上記で求めた電氣的短絡部間の距離 lc よりも小さくなるときの任意次数以下の各※50

※燃線に電氣的短絡部を設ける。任意次数よりも大きい次数の各燃線に関しては、電氣的に短絡させる手段を設ける。これにより、各次数の内の次数が低い、即ち燃りピッチが小さい燃線までの安定性を確保できる。一般に、素線間の電流移行は、常電導転移した素線に最も近い素線に最も有効に作用し、高次数になる程、その分流効果が小さくなるため、燃り次数の高い超電導素線では、必ずしも全ての次数の燃線が上記の安定条件を満たす必要はない。この場合には、上記一部の次数の燃線に電氣的短絡部を設けるだけで、超電導ケーブルの安定性を十分に確保できる。

【0098】次に、上記第2実施形態の第1~第5応用例を図11~図15に基づいて説明する。この各応用例は、上記高安定性及び低交流損失の利点に加え、電氣的短絡部を具体的に形成し、高電流密度をも加味した超電導ケーブルに適用したものである。

【0099】図11に示す第1応用例の超電導ケーブルは、表面に絶縁処理（又は高抵抗化処理）を施した複数本の超電導素線40...40を軸方向を中心とする同心円の円周方向で長手方向に沿って同じ燃りピッチ1pで燃り合わせ、その燃りピッチ1pの整数倍毎に電氣的短絡部（又は他の箇所に比べ電氣抵抗の小さい箇所）41...41を設けている。このように各素線40...40を同心円状に配列したため、超電導ケーブルのボイド率（空間率）を約20%まで減少させることができ、従来の燃り次数の多い超電導ケーブルのボイド率（通常、約36~38%）と比べ、その電流密度を大幅に高めることができた。

【0100】次に、ケーブル・イン・コンジット型の強制冷却導体を例に上げる。この場合には、燃りピッチ毎に周期的に断面積が小さく、即ちボイド率が小さくなるように素線間の接触圧力を大きくすることで、ピッチの整数倍毎に電氣的短絡部を形成できる。この超電導ケーブルの一例を図12~図14に示す。

【0101】図12(a)及び(b)に示す第2応用例の超電導ケーブルでは、円筒状のコンジット50内に燃り合わされた複数本の超電導素線51...51と、この各超電導素線51...51の中央に円筒状の冷却チャネル52とを配置したもので、各素線51...51の表面には2~10 μ mのクロム、ステンレス、チタン等の高抵抗体メッキ、スパッタリング等の方法でコーティング処理されている。この超電導ケーブルでは、冷却チャネル5

21

2よりも外径が大きい複数の円環状の凸部（外径拡大部）53…53を素線51…51の撚りピッチ毎1pに冷却チャネル52の外周面側に一体に又は別体に設けることで、各素線51…51間の接触圧力を撚りピッチ毎1pに増加させている。従って、この超電導ケーブルでは、接触圧力が増加した撚りピッチ毎に電氣的短絡部を容易に形成できる。

【0102】図13に示す第3応用例の超電導ケーブルでは、円筒状のコンジット60内に撚り合わされた複数本の超電導素線61…61を配置したもので、コンジット60よりも内径が小さい複数の円環状の凸部（内径縮小部）62…62を各素線61…61の撚りピッチ1p毎にコンジット60の内周面側に一体に又は別体に設けることで、各素線61…61間の接触圧力を撚りピッチ1p毎に増加させている。

【0103】図14に示す第4応用例の超電導ケーブルでは、円筒状のコンジット70内に多層の撚りをもつ複数本の超電導素線71…71を配置したもので、最外層の外周部、最内層の内周部、及び各層の外周部の内の少なくとも1つに撚りピッチの整数倍毎にテープ幅が導体の大きさよりも十分小さい幅を有する銅、ステンレス等の金属テープ（又は絶縁テープ）72を巻くことで、撚りピッチ1pの整数倍毎に各素線71…71間の接触抵抗を小さくしている。

【0104】なお、Nb₃Sn等の熱処理導体で超電導素線を形成した超電導ケーブルでは、導体の熱処理時に加圧箇所を拡散接合することで上記効果をより一層高めることができる。また、NbTi等の非熱処理導体の場合でも、100～400℃の温度条件で加熱処理することで、加圧箇所を固相接合でき、上記効果を高めることができる。

【0105】図15に示す第5応用例の超電導ケーブルでは、コンジット80内に超電導素線81…81を同心円の異なる半径の円周方向に層状（図中の1層82、2層83参照）に且つ全て同じ撚りピッチ1pで撚り合わせて配置している。ここで、各素線81…81の中央に円筒状の冷却チャネル84を設け、1層82及び2層83の各素線81…81の撚りピッチ1pの整数倍毎に電氣的短絡部85…85を設ける。このように各素線81…81を同心円の異なる半径で層状に配置したため、ボイド率を約20%まで減少させることができた。

【0106】この超電導ケーブルでは、隣接する各層82、83の撚り方向を互いに逆方向としたため、冷却面積が増加する利点のほか、撚線に起因した縦磁界の影響を互いに相殺できる。また、同心円の層数を偶数（図15では2層）に設定してあるので、導体長手方向の縦磁界による結合電流（偏流）の影響を殆ど完全に打ち消すことができ、上記高安定性の効果を最大限に高めることができる。

【0107】（第3実施形態）次に、本発明の第3実施

22

形態を図15に基づいて説明する。この第3実施形態は、上記各実施形態で述べた電氣的短絡部を備えていない従来タイプの超電導ケーブルに適用したもので、超電導素線における撚線の撚りピッチ及び導体径などの最適値選定の条件を具体的に規定している。

【0108】まず、撚線の撚りピッチ及び導体径の設定例を図15に基づいて説明する。

【0109】図15は、磁界変化率に対する誘導起電力と常電導電圧との関係を説明するグラフで、横軸に超電導素線における撚線の撚りピッチ1p及び導体径Dの積（1p×D）をとり、縦軸に外部磁界変化に起因して素線間に生じる誘導起電力eをとって、誘導起電力eと素線の常電導転移時における常電導部の発生起電力（ $R_n \times I_d$ ）との関係から、1p×Dの最適値を求めるものである。ここで、「誘導起電力e」は、 $e = -d\phi/dt = -d(B \cdot I_p \cdot D/\pi)/dt$ の式で求まる起電力を意味する。

【0110】ここで、素線間の結合電流が素線間の電流再配分を妨げないための条件として、磁場変化率（ dB/dt ）（図中の例ではB1…B3（ドット省略））に対して生じる誘導起電力eが常電導電圧 $R_n \times I_d$ よりも小さい条件に着目し、当該導体が経験する任意の磁場変化率に対して常に $e \leq R_n \times I_d$ の条件を満たす1p×Dの範囲を決定する。このように決定される1p×Dの範囲から撚線の撚りピッチ1p及び導体径Dを設定する。

【0111】例えば、超電導ケーブルに通常使用される素線（導体）において、局所的に発生する外乱に起因して生じる常電導領域の電圧は $50 \mu\Omega \times 100A = 5mV$ 程であり、磁場変化率を $0.3T/s$ と仮定すると、その磁場変化に基づく誘導起電力eが常電導発生電圧以下の条件（ $e \leq 5mV$ ）を満たす1p×Dの範囲は、 $0 \sim 0.5m^2$ 以下となる。

【0112】また、複数段の撚線をもつ超電導ケーブルでは、各撚り次数毎に誘導起電力eの総和を求め、その誘導起電力eの総和が上述した熱拡散距離ld及び撚りピッチ1pの内の小さい方の距離で定まる常電導発生電圧 $R_n \times I_d$ よりも小さくなる条件で1p×Dの範囲を決定すればよい。

【0113】このように1p×Dの範囲を決定し、撚りピッチ1p及び導体径Dを設定することで、素線を多段に撚り合わせた場合でも、結合電流の存在下で十分に大きな移行電流を得ることができ、安定な超電導ケーブルを提供できる。

【0114】

【発明の効果】以上説明したように、請求項1記載の発明に係る超電導ケーブルにおいては、撚り次数が同じ撚線間の単位長さ当たりの電気抵抗値を、撚り次数が高い撚線間ほど大きくしたので、同じ撚り次数の撚線間の単位長さ当たりの電気抵抗値を1段前の撚線間の電気抵抗値以

23

上とすることで、高次側燃線間の電気抵抗値を大きく、低次側燃線間の電気抵抗値を小さくとすることができ、外部磁場の変化（交流による交流磁界の発生）で超電導ケーブルの断面（導体断面）内に誘起される渦電流のパスは高次側燃線間では大きな電気抵抗のため生じにくく、結合電流の大きなパスを無くすことができ、素線間結合損失（交流損失）を低減させることができる。また、低次側燃線間では鎖交する磁束が小さいので、結合電流による交流損失は非常に小さく、殆ど無視できる。

【0115】また、この超電導ケーブルに局所的な入熱や電流の偏りが発生して1本の超電導素線が常電導転移しても、低次側燃線間の電気抵抗が小さく、低次側は燃線内の超電導素線が隣接する超電導素線間の電氣的結合（カップリング）が強く、超電導状態を維持している超電導素線には、素線間電気抵抗が小さいため多くの電流が素早く隣接する周辺の複数本の超電導素線に移り、電流の再配分性や電流の移行性が良好であるため、常電導転移した超電導素線のジュール発熱を減少させ、抑制することができ、常電導転移した超電導素線を超電導状態に再び回復させることができるので、全体として超電導状態を崩すことなく、常時、超電導状態に維持でき、安定性を向上させることができる。

【0116】請求項2記載の発明では、最終燃り次数がN次の高次燃線のうち、(N-1)次以下の燃線のうち、少なくとも1つの任意次数の燃線外表面に、高抵抗体の被膜を形成したので、高抵抗体被膜が施された所要次数の燃線間の超電導素線が相互に接する部分に被膜が施されないため、その燃線間の電気抵抗が変化せず、小さい。

【0117】また、高抵抗体被膜が施された燃線がさらに燃り合されてより高次の燃線が構成されると、高次の燃線間の電気抵抗は大きいので、結合損失に伴う交流損失が小さい。したがって、この超電導ケーブルは超電導素線間の電流移行の再配分性を改善し、安定性を向上させることができるとともに、交流損失を低減させることができる。

【0118】請求項3記載の発明では、燃り次数の高い燃線の外表面にコーティングされる高抵抗体の膜厚を厚くしたので、燃線の燃り次数が大きくなるに従って燃線間の電気抵抗値を大きくすることができ、また、請求項4に記載の超電導ケーブルでは燃り次数が大きくなるに従って燃線外表面に抵抗率の大きな材料をコーティングさせることができ、いずれも燃り次数の違いに応じて燃線間の電気抵抗値に差を設けることができ、請求項2によって得られる安定性の増大と交流損失の低減をより一層図ることができる。

【0119】請求項5記載の発明では、燃線の燃りピッチは燃り次数が大きくなるほど大きくしたので、燃り次数の高い燃線ほど燃りピッチを大きくとることができる。燃のピッチが大きいと燃線間の接点が減少し、電気

24

抵抗を大きくすることができるので、結合電流による交流損失を低減させることができる。

【0120】請求項6記載の発明では、一次燃線の燃りピッチを超電導素線の外径の20倍以下とすることで、超電導素線間の圧縮力を大きくとることができ、燃り次数の一番少ない一次燃線間の電気抵抗を極めて小さくすることができ、電流の再配分性や移行性を向上させ、安定性を向上させることができる。

【0121】請求項7記載の発明では、二次燃線間および三次燃線間の電気抵抗を一次燃線と同様に小さくすることができ、二次燃線や三次燃線を低次側燃線とする超電導ケーブルに効果があり、安定性を向上させることができる。

【0122】請求項8記載の発明では、高次燃線に臨界荷重以下の引張荷重を印加させ、燃線間を圧着させることで、燃線内の超電導素線間の結合力を向上させて、燃りピッチを増加させても、電気抵抗を小さくすることができ、安定性の高い超電導ケーブルが得られる。

【0123】請求項9記載の発明では、燃りピッチ L_{pn} がN次の高次燃線における(N-1)次の燃線間の電気抵抗が、燃りピッチ L_{p1} の一次燃線の超電導素線間の電気抵抗の(L_{pn}/L_{p1})の2乗倍以上としたので、各次数の燃線で発生する結合損失を均等化し、交流損失の低減を図ることができる。この超電導ケーブルは、ケーブル断面（導体断面）内の任意の超電導素線間に生じる結合電流に伴う交流損失は、燃りピッチの比の2乗に比例することに考慮したものである。

【0124】請求項10記載の発明では、高次燃線を不活性ガスあるいは真空中で昇温させて燃りの交差部を固相拡散接合させ、電氣的短絡部を形成したから、高次燃線内の超電導素線同士が互いに融着し、素線間電気抵抗が極めて小さな状態を実現でき、安定性の高い超電導ケーブルを実現できる。

【0125】請求項11記載の発明では、電氣的短絡部の電気抵抗値を前記〔数6〕の条件式を満足する範囲に設定したため、外乱に起因して1本の素線が常電導転移した場合でも、その電流の多くを超電導状態を維持している健全な素線に移行させることができ、これにより、常電導転移した素線におけるジュール発熱を抑制して再び超電導状態に回復させることができ、安定性を大幅に高めることができる。このような高安定性の利点に加え、電氣的短絡部の電気抵抗値の選定基準を明確にしたことで、実用性を大幅に高めることができる。

【0126】請求項12記載の発明では、電氣的短絡部間の距離を前記〔数7〕及び〔数8〕の条件式を満足する範囲に設定したため、電流の移行が冷媒の冷却能力が大きい時間内に超電導転移した素線に流れる電流を素早く移行させることができ、安定性を大幅に高めることができると共に、電氣的短絡部間の距離の選定基準を明確にしたことで、実用性を大幅に高めることができる。

【0127】請求項13及び14記載の発明では、高次燃線に関する各燃りピッチ及び電気的短絡部の位置を明確に規定したため、全ての次数の燃線又は必要最小限の次数の燃線までの安定性を大幅に高めることができる。

【0128】請求項15及び16記載の発明では、燃線の燃りピッチを外部磁界の変化に起因して生じる誘導起電力が常電導転移時における発生電圧よりも小さい条件を満足する範囲に設定したため、結合電流による電流偏流の存在下でも十分大きな移行電流を得ることができ、安定性を大幅に高めることができる。

【0129】請求項17～19記載の発明では、層状に配置した複数層の燃線に電気的短絡部を設けたため、上記と同様の高安定性の利点に加え、高電流密度化を図ることも同時に実現できる。

【0130】請求項20記載の発明では、燃線のボイド率を低めることで電気的短絡部を構成したため、上記と同様の高安定性の利点に加え、電気的短絡部を容易に設けることができ、実用性を大幅に高めることができる。

【0131】以上、請求項11～20記載の発明では、冷却性能が維持される時間内に常電導転移した素線から超電導状態を維持している素線に多くの電流を移行させることができ、その結果、ケーブルに変動磁界が加わった場合でも燃りピッチ内に生じる正負両方向の誘導電圧を相殺できる。また、何らかの外乱で一部の超電導素線が常電導転移した場合でも高い安定性を維持できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る超電導ケーブルの第1実施形態を示す斜視図。

【図2】超電導ケーブルの横断面を拡大して示すケーブル断面図。

【図3】超電導ケーブルに備えられる各燃線の素線（燃線）間電気抵抗と燃りピッチ／素線径（燃線径）との関係を示す図。

【図4】超電導ケーブルの変形例を示す図。

【図5】超電導ケーブルの他の変形例を示す斜視図。

【図6】6×6×6型の多重燃線構造を有する超電導ケーブルを示す図。

【図7】矩形燃線構造の超電導ケーブルを示す図。

【図8】本発明に係る超電導ケーブルの第2実施形態の抵抗設定例を説明する図。

【図9】超電導素線間の移行電流を説明する概略回路図。

【図10】短絡部間の距離と回路時定数との関係を示すグラフ。

10 【図11】第1応用例の超電導ケーブルを示す概略斜視図。

【図12】（a）及び（b）は第2応用例の超電導ケーブルを示す概略斜視図。

【図13】第3応用例の超電導ケーブルを示す概略斜視図。

【図14】第4応用例の超電導ケーブルを示す概略斜視図。

【図15】第5応用例の層状の超電導ケーブルを示す図で、（a）は概略側面図、（b）は（a）中のA-A線から見た概略断面図。

20 【図16】第3実施形態の超電導ケーブルの燃りピッチ及び導体径の設定例を説明するグラフ。

【図17】従来の超電導ケーブルを示すケーブル断面図。

【符号の説明】

5 コンジット

10, 10A, 10B, 10C 超電導ケーブル

11 超電導素線

12, 25 一次燃線

30 13, 26, 33 二次燃線

14, 27 三次燃線

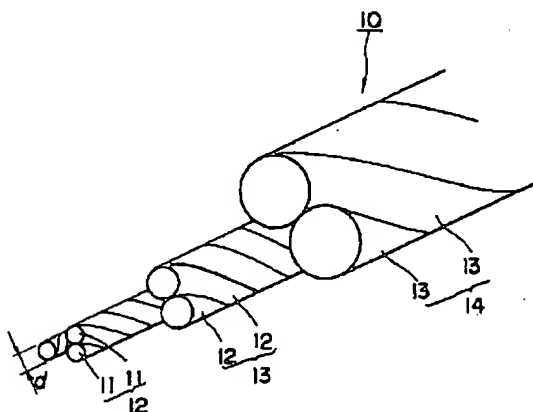
16, 20 一次コーティング材

17, 21 二次コーティング材

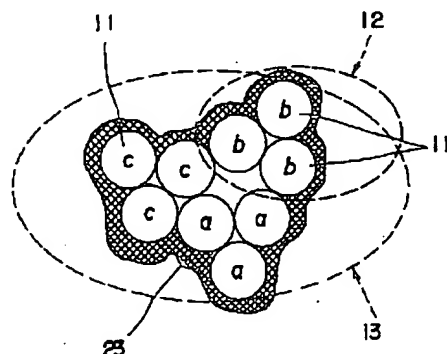
18, 22 三次コーティング材

28, 29, 30 補強用芯線

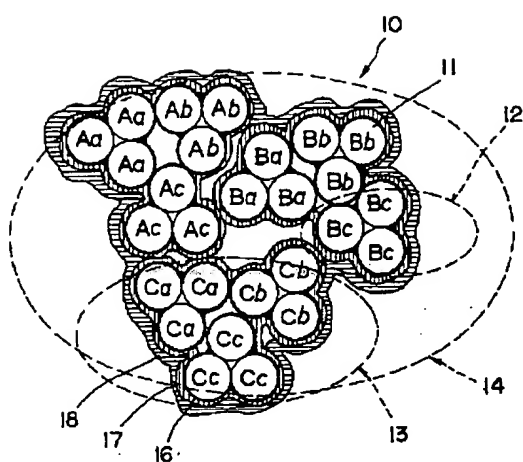
【図1】



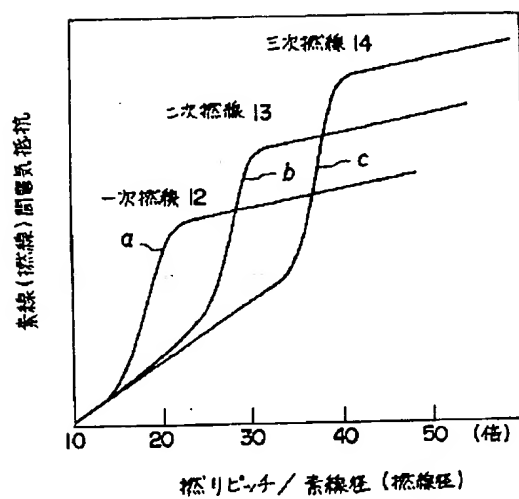
【図5】



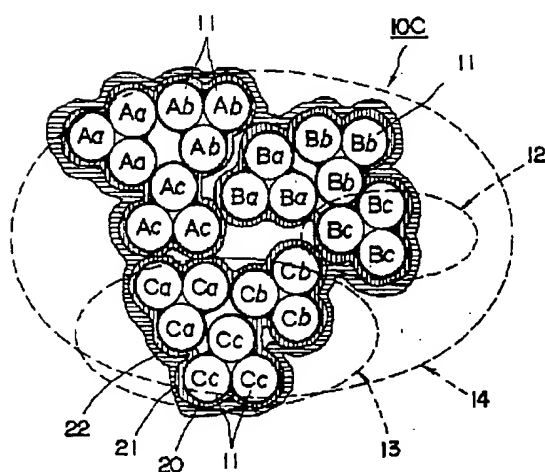
【图2】



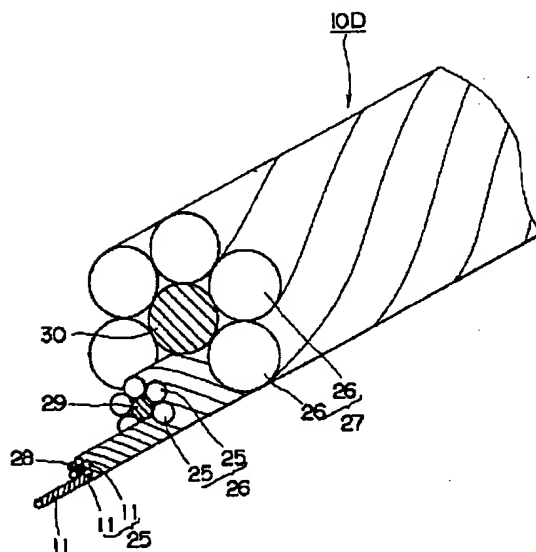
【図3】



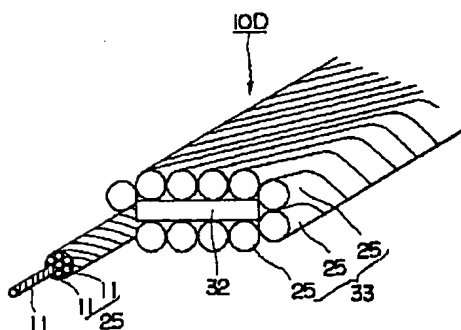
【図4】



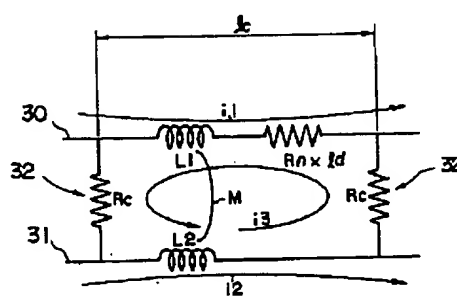
【図6】



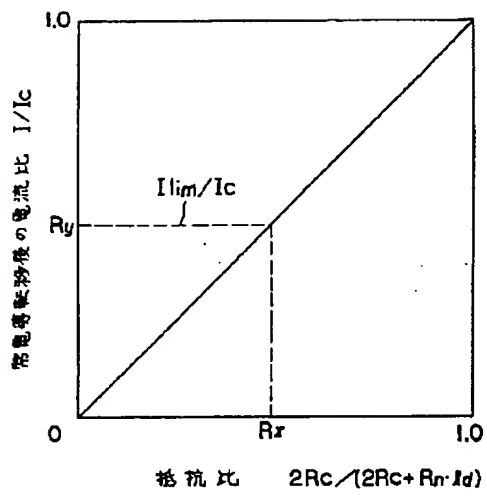
【図7】



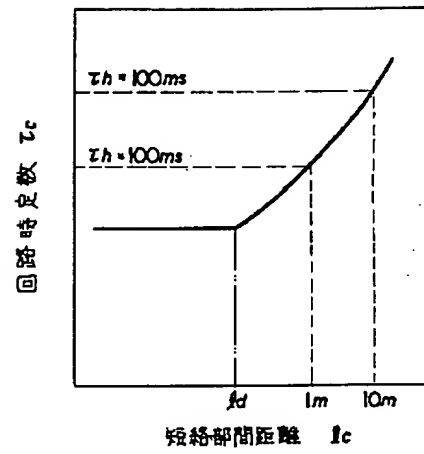
【図9】



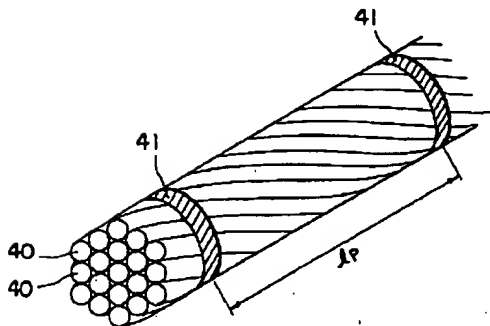
【図8】



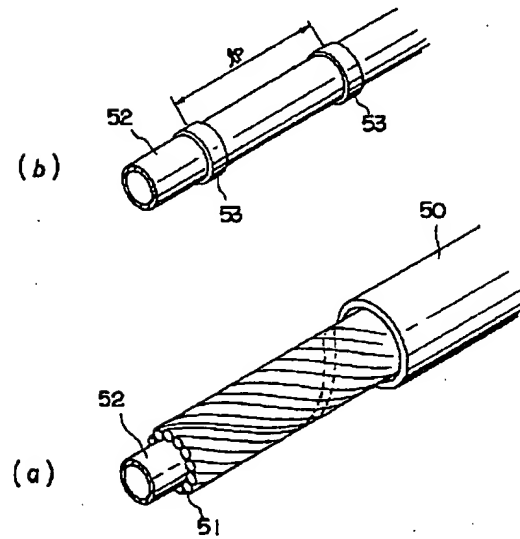
【図10】



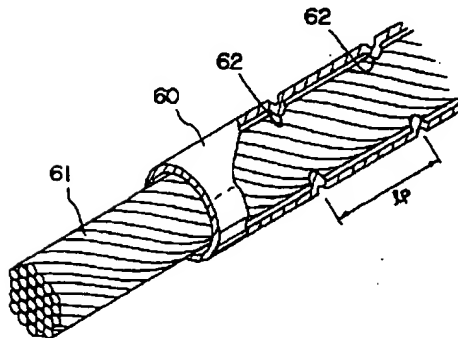
【図11】



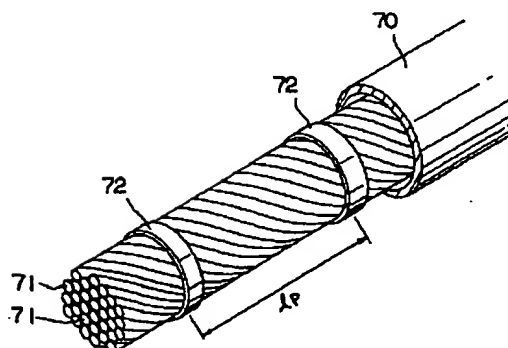
【図12】



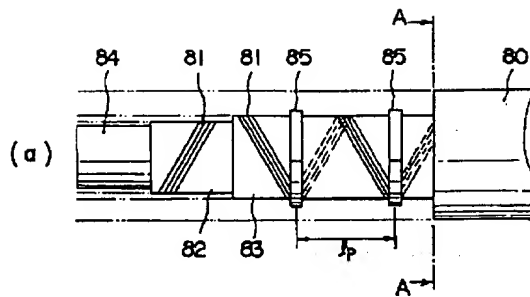
【図13】



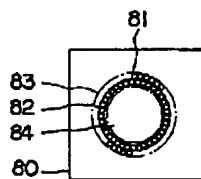
【図14】



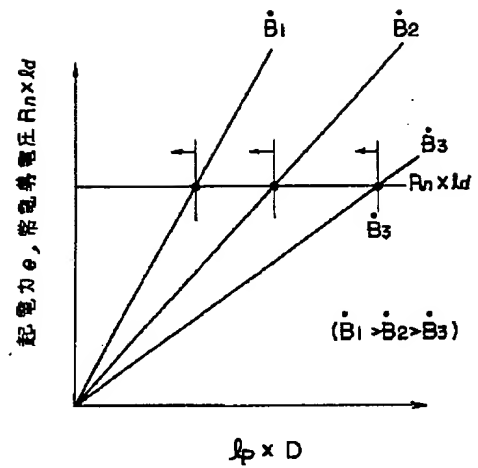
【図15】



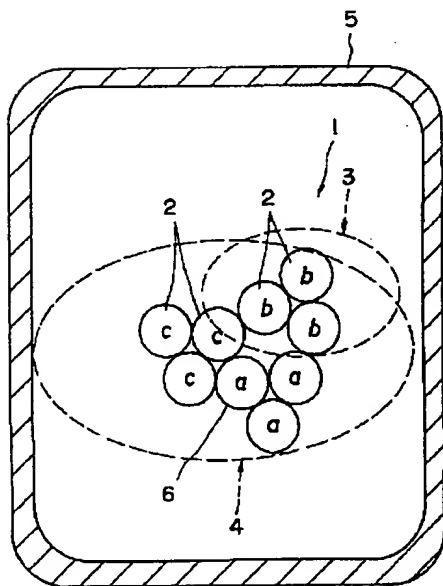
(b)



【図16】



【図17】



フロントページの続き

(72)発明者 浜島 高太郎
神奈川県横浜市鶴見区末広町2の4 株式
会社東芝京浜事業所内

(72)発明者 藤岡 勉
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会
社東芝本社事務所内